

## 審査の結果の要旨

氏名 晝間 正治

修士（工学）晝間正治提出の論文は、「**Simultaneous Optimization of Flight Trajectory and Robust Controller and its Application to Hypersonic Aircraft**（飛行軌道とロバスト制御則の同時最適化と極超音速機への適用）」と題し、6章から構成されている。

次世代極超音速機において、制御性能の厳しい設計要求を達成するためには、飛行軌道と制御則の統合設計が必要不可欠である。その理由は、極超音速飛行では飛行軌道と制御性能のカップリングが亜音速と比べてより強く表れるためである。また、飛行マッハ数の大きな変化に伴い空力特性が変化することでシステムの安定性を確保することが難しいからでもある。飛行条件の変化やシステムの不確実性に対して安定性を確保するためにロバスト制御の適用が提案される。しかしながら、制御性能は飛行軌道によって大きく左右されるため、追従誤差を最小限に抑える軌道を生成するためには、飛行軌道とロバスト制御則の同時最適化が必要である。以上を踏まえ、本論文の目的は極超音速機などの飛行軌道と制御性能に強いカップリングを持つ航空機に対し、飛行軌道と飛行条件の変化に対してロバストな飛行制御則の同時最適化の手法を提案し、極超音速機を含む諸問題に提案手法を適用することである。

第1章は序論であり、過去の極超音速実験機の研究開発例、および飛行軌道とロバスト制御器設計に関する先行研究ならびに研究課題をまとめたうえで、本論文の位置づけを述べている。

第2章では、飛行軌道とロバスト制御則の同時最適化について、追従誤差の許容最大値を不等式制約として課す軌道最適化問題を設定し、新たな同時最適化手法の提案を行っている。軌道最適化の反復計算ごとに、軌道を複数区間に離散化して各区間を線形回帰モデルより伝達関数として同定し、この伝達関数に構造化  $H_{\infty}$  制御系設計を適用して飛行条件の変化に加えて軌道に対してもロバストな PI ゲインを求める。そして、軌道を追従目標とし、求められた PI ゲインによるフィードバック制御を行った場合の最大追従誤差を非線形シミュレーションによって求め、これが設定された許容値以下になるよう軌道とロバスト

制御則の設計が行われる。この提案手法では、軌道を伝達関数として表すことによって、飛行軌道とロバスト制御則の同時最適化が可能となった。

第 3 章では、航空宇宙分野の問題を含む最適制御の諸問題に提案手法を適用し、軌道とロバスト制御則を別々に設計する従来手法との比較を行った。従来手法では、飛行軌道に対してロバストな制御器設計を行うことは難しく、さらに最終結果がシステムへの要求を満たさなければ、軌道と制御器の再設計が必要であった。一方、提案手法では評価関数の改善に加え、最大追従誤差を不等式制約に含めることで追従性能も向上した。加えて、軌道に対するロバスト性も確保することができた。

第 4 章では、宇宙航空研究開発機構が開発している予冷ターボジェットエンジンを搭載した極超音速実験機について、軌道とロバスト制御則に加えて最適なエレボン面積を求める同時最適化問題を定義し、提案手法を適用している。この実験機は固体ロケットで打ち上げられ、高度 100km 到達後に分離され揚力飛行へと移る。分離後の揚力飛行の軌道に対する自由度は高いことから、提案手法により軌道を制御性能が高くなるように最適設計することが可能である。まず、極超音速機の機体設計と空力モデルの構築について説明し、続いて実験機が搭載される固体ロケットについて説明している。提案手法を適用することで、実現性の高い軌道とロバスト制御則を設計でき、従来手法では不可能であった軌道に対するロバスト性の検討が可能となった。また、エレボン面積を設計変数に含むことで、追従性能を満たすための最適なエレボン面積が得られ、有用な知見が得られた。

第 5 章では、前章で得られた飛行軌道とロバスト制御則、およびエレボン面積を用いて、固体ロケットと実験機の分離時に生じる状態量の不確かさがエンジンと巡航試験に関するミッション要求の成功率に与える影響を、モンテカルロシミュレーションにより評価している。状態量の不確かさによる軌道の分散が存在する場合においても飛行実験は高い成功確率になることを示した。

第 6 章は結論であり、本研究の成果と新規性をまとめ、提案手法の発展性を述べている。

以上要するに、本論文は航空機の飛行軌道とロバスト制御則の同時最適化に関する新たな手法を提案し、極超音速機の設計問題に適用している。様々な空力や状態推定誤差、および外乱を含む制御システムの構築において、ミッション要求を高い確率で満たす飛行軌道とロバスト制御則を求めることが可能となり、航空宇宙工学上貢献するところが大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。